ChinaXiv合作期刊

第 38 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.38,No.6
2018 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201703050361
张翀,雷田旺,宋佃星.黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析.生态学报,2018,38(6):2128-2138.
Zhang C, Lei T W, Song D X.Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau.Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2128-2138.

黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析

张 翀*,雷田旺,宋佃星
宝鸡文理学院,陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室,宝鸡 721013

摘要:基于 2000—2014 年的 MODIS-NDVI 与 MODIS-LST 数据,利用温度植被干旱指数对黄土高原土壤湿度进行了反演,采用时滞互相关法分析了土壤湿度与植被覆盖的年内变化特征及其时空相互关系。结果如下:(1)黄土高原植被生长对土壤湿度变化存在明显的时滞效应,植被生长以及植被物候与土壤湿度变化密切相关。(2)黄土高原土壤湿度对其植被覆盖变化影响强烈区,主要分布在农业与草原生态区北部的丘陵沟壑区,植被生长对土壤湿度响应迟缓;而植被覆盖对土壤湿度变化影响强烈区,分布于西部的高寒地带,响应时间相对最短,其次为农业与草原生态区内河流中上游流域,且土壤湿度对植被覆盖的响应较快,自东向西、自北向南响应逐渐加快。(3)从植被类型来看,Ⅰ类植被的植被覆盖与土壤湿度负相关性较强,植被生长对土壤湿度变化的响应程度依次减弱,响应速度较慢且依次加快。Ⅱ类植被的植被覆盖与土壤湿度的相关性很弱,滞后时间接近于 0 天,反映出植被覆盖与土壤湿度同步变化。土壤湿度变化滞后于Ⅲ类植被(旱生/沙生植被)的植被覆盖变化,植被覆盖正向影响土壤湿度变化的强度依次增加,但时间效应依次延长。Ⅳ类植被(高山/高寒植被)生长对土壤湿度变化的正向影响程度最强,而且响应速度较快。(4)黄土高原植被生长与土壤水分的年内变化具有密切的关系,土壤水分年内变化的峰值和谷值与植被物候期非常吻合,因此土壤水分的年内变化可作为植被物候特征提取的一种重要依据。
关键词:土壤湿度;植被覆盖;Whittaker 平滑;时滞关联;黄土高原

Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau

ZHANG Chong*, LEI Tianwang, SONG Dianxing
Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

Abstract: Based on the MODIS-NDVI and MODIS-LST data from 2001 to 2014, we have estimated the soil moisture using temperature vegetation dryness index, analyzed the spatiotemporal seasonal variation of the vegetation cover and soil moisture and their interrelationship in the Loess Plateau. The findings suggest the following: (1) There are obvious time-lag effect for vegetation growth relative to soil moisture in the Loess Plateau. The vegetation cover and vegetation phenology is closely related to soil moisture change. (2) The intense affected area of soil moisture to vegetation cover located mainly in the mountains and hills of the northern agriculture and grassland biome, which the vegetation cover has slow response. The intense affected area of vegetation cover to soil moisture spread over the western alpine region, which the response time of soil moisture is relatively shortest. The second one distributes across the upper and middle reaches of the rivers in the northern agriculture and grassland biome, and the soil moisture respond slowly. The response speed gradually increase from east to west and from north to south. (3) From vegetation types, there are relatively strong negative correlations between

基金项目:宝鸡文理学院校级重点项目(ZK16064);陕西省社会科学基金项目(2016G013)
收稿日期:2017-03-05; **网络出版日期:**2017-12-19
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangch3348@126.com

chinaXiv:201804.00269v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

vegetation cover and soil moisture of vegetation Ⅰ that the response degree of vegetation growth to soil moisture change weakens successively, and their response rate is relatively slow and speed up. A weak correlations were found between vegetation cover and soil moisture of vegetation Ⅱ, and their lag time are close to 0 day, which reflects vegetation cover and soil moisture change simultaneously. The soil moisture changes lag behind vegetation cover change of vegetation Ⅲ (xerophytic/psammophytic vegetation), and the degree that vegetation cover positive impacts on soil moisture increase consequently, but time effects extend. The positive impact of alpine vegetation (vegetation Ⅳ) to soil moisture is strong which has better response speed. (4) There is close relationship between the annual variance of vegetation growth and soil moisture in the Loess Plateau. The vegetation phenology is a good fit to the peak and valley of soil moisture changes over the years which can be used as an important evidence for the extraction of vegetation phenological information.

Key Words: soil moisture; vegetation cover; Whittaker smooth; time lag correlation; the Loess Plateau

植被覆盖变化是区域生态系统环境变化的重要指示,是衡量地表植被状况的重要指标,对水文、生态、全球变化等都具有重要意义;同时,植被覆盖又是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子。随着气温的不断升高,地表蒸散发加大、河湖萎缩与干涸、雪线抬升,气候和环境的干旱化成为严峻的生存环境问题,进而使得土壤湿度继续降低,土壤旱化程度加重,不仅反馈给植被发生水分胁迫,致使植被正常生理代谢失调,从而影响地表植被覆盖的变化,而且当土壤形成不可逆转的干层时,又会影响到降水或地表水入渗补给地下水,以及陆地水循环[1-2]。由此可见,土壤水分是气候、土壤和植被影响水分循环和水分循环影响植被生长综合起来的关键因子[3]。

土壤水分是植物蒸腾作用和光合作用的限制性因子,土壤水分决定了生态建设中植被类型和结构,是植物生长、植被恢复、土壤侵蚀的主要影响因素[4]。而黄土高原地处干旱—半干旱气候区,雨量少,水资源缺乏,水土流失和荒漠化严重,生态环境十分脆弱,易破坏、难以恢复,加之土层厚,地下水埋藏深,土壤水分是植物生长所需水分的主要来源,降水、地表水及地下水转换为土壤水分才可被植被吸收,因而土壤含水量的多寡与植被的生长密切相关,进而影响植物的多样性,又通过影响其他生境因子间接地影响着多样性的维持,而生态系统的主要“构件”物种多样性对水分变化的响应直接影响着生态系统的功能和稳定性[5-6]。因此,土壤水分是影响黄土高原环境演变的重要因子,作为水量平衡、水循环、生态系统演变以及土壤资源的重要因素,已经得到了广泛的关注[4]。同时,植被覆盖大小也会影响土壤湿度发生变化,如干旱与半干旱地区植被覆盖越大、根系越深,土壤干燥深度与程度越大[7],植被覆盖度对土壤水分含量影响较大,在保持其原有的丛生密根性植物建群和较高覆盖度时,随盖度增加,土壤水分含量呈显著抛物线型趋势增加[8]。刘刚等研究表明除农地外,其他植被类型下都不同程度的存在着土壤干层,干层严重程度,林地大于灌木林地,灌木林地大于草地;草地存在临时干层和永久干层[9]。

土壤湿度的传统监测方法包括中子仪法、快速烘干法、重量法、γ 射线衰减法、电阻法和张力计法等,这些方法能有效监测土壤湿度,是土壤湿度监测、研究、应用的主要手段,但是该方法采样速度慢、耗费大量人力和物力、使用范围有限,加之测站分布不均,难以实现大范围、实时、精确的监测。随着遥感技术的迅速发展,遥感数据的多时相、多光谱、多分辨率、高光谱等特性,使得土壤水分快速、实时、动态监测成为可能[10-13]。在土壤水分遥感反演中,通过地表温度和植被覆盖特征空间反映土壤水分的遥感监测得到了广泛应用[14-17],温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)由于其计算过程输入数据少、简单易行、生物物理学含义明确等特点,因此本文选用其来表征土壤水分的高低。本研究以广义的黄土高原范围作为研究对象,基于 Matlab 软件图形用户界面(Graphical User Interface,GUI)功能,分别创建了 TVDI 批量生成 GUI、Whittaker 平滑 GUI 和时滞互相关 GUI,利用植被覆盖与地表温度数据构建了 TVDI,用以反映黄土高原土壤湿度,并分析了植被覆盖与土壤湿度的年内变化及其相互关系时空变化特征,进而统计不同植被类型植被覆盖与土壤湿度的年内相互关系。

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

1 研究区概况

对于黄土高原的范围界定问题,一般具有狭义、中义和广义之分。黄土高原的狭义范围指的是长城沿线以南,秦岭以北,吕梁山以西,青藏高原东缘,测算大致30万 km^2,强调完整的自然单元;中义范围指长城沿线以南,秦岭以北,太行山以西,日月山以东(包括日月山和青藏高原东缘之间的区域),测算大致43万 km^2,强调的是完整的地貌单元;黄土高原的广义范围为阴山以南、西北以贺兰山为界线,秦岭以北,以东包括太行山东麓,日月山以东,强调整个黄土高原与黄河中游整个水土流失的联系。

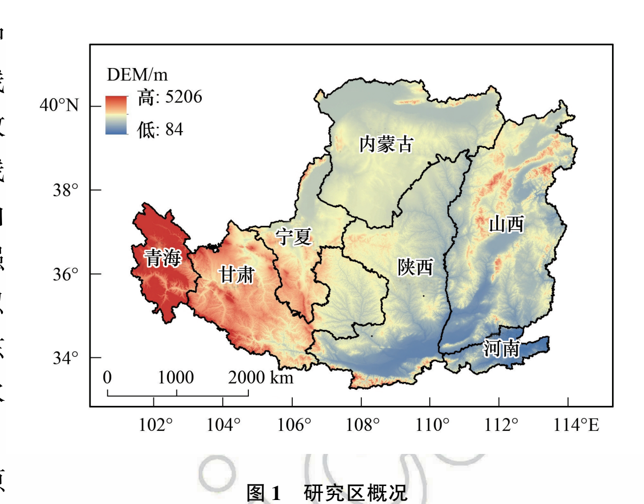


图1 研究区概况

Fig.1 The survey of research area

本文采用的是广义的黄土高原范围,广义黄土高原西起祁连山支脉乌鞘岭,东迄太行山,北到长城,南抵秦岭。横跨青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫7省区大部或一部,面积约63万 km^2,约占全国陆地总面积的8%。是东南湿润季风气候向西北内陆干旱气候过渡、暖温带落阔叶林向典型草原和荒漠草原过渡的过渡地带。受温带大陆性气候的控制,气温、降水量季相分明;从东南向西北,气候依次为半湿润气候、半干旱气候和干旱气候;土壤依次为褐土、垆土、黄绵土和灰钙土;植被包含11个植被型组,23个植被型,171个群系,11个植被型组分别为针叶林、落叶林、灌丛、草丛、草原、草甸、荒漠、沼泽、沙生植被、栽培植被及高山稀疏植被,植被类型从东南向西北,依次为森林植被、森林草原植被、温性草原植被荒漠半荒漠植被[18]。

2 研究方法

2.1 资料来源

本文所用数据包括黄土高原2001—2014年MODIS-NDVI、MODIS-LST以及生态区划和植被类型数据。MODIS-NDVI来自LP DAAC中的MODIS产品的MOD13A2数据集,空间分辨率为1000m,时间分辨率为16d,时间节点分别为1、17、33、…、353,利用单位转换系数0.0001将其转为0—1之间;MODIS-LST来源于MOD11A2,空间分辨率为1000m,时间分辨率为8d,利用单位转换系数0.02将其转为开尔文单位(Kelvin),由于LST存在大面积的无效数据,所以采用Cressman客观分析法与非对称高斯函数拟合[19],将8dLST数据进行重构,为了与NDVI数据时间分辨率统一,采用平均值合成法将其合成为16d数据。生态区划数据来源于中国生态系统评估与生态安全格局数据库(www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp),该数据集是在生态环境问题、生态系统敏感性、生态系统服务功能重要性的基础上,将一系列相同比例尺的评价图,采用空间叠置法、相关分析法、专家集成等方法,按生态功能区划的等级体系,通过自上而下划分方法进行生态功能区划方案划分,生态区划主要用于分析植被覆盖与土壤湿度年内关系的空间分布以及植被群落特征,属于植被的宏观特征。植被类型数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn),由"七五"重点科技攻关项目(74-04-03-02)成果系列图扫描后数字化而形成500m空间分辨率的栅格数据集,主要用于分析植被覆盖与土壤湿度年内关系的植被类型特征,属于植被的中观特征。

2.2 土壤湿度估算

Sandholt等指出地表温度(Land Surface Temperature, LST)和植被覆盖(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的梯形空间可以反映土壤水分高低(图2),所以本文采用TVDI来表征土壤湿度[20],TVDI基于植被指数/地表温度的梯形特征空间计算而来,原理如下:

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

$$\mathrm{TVDI} = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}} \tag{1}$$

其中,Ts 为每个像元的 LST;Ts_{min} 为对应像元湿边的 LST,Ts_{max} 为对应像元湿边的 LST(图 2)。

干边和湿边的拟合是计算 TVDI 的关键环节。首先,将 NDVI 的值域 0—1 划分为 100 个节点,节点之间相差 0.01;然后,以每个节点为中心左右分别扩展 0.005 个单位形成一个区间,并在区间内查询 LST 的最大值和最小值;最后,分别以节点值序列为自变量,LST 的最大值和最小值序列为因变量进行一元线性回归拟合,从而得到干边和湿边,再根据式(1)计算出每个像元的 TVDI。本文中干湿边拟合均采用 Theil-Sen 趋势法,以此剔除数据中存在的异常值,使得拟合的干湿边方程更为稳健。TVDI 值域在 0—1 之间,TVDI 越大,土壤湿度越低,TVDI 越小,土壤湿度越高。本文采用 1-TVDI 来表示土壤湿度的大小,值越小,土壤湿度越低,值越大,土壤湿度越高。

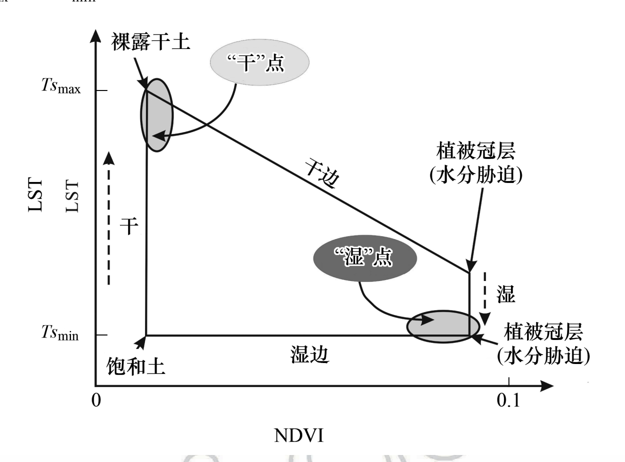


图 2　NDVI 与 LST 构建 TVDI 示意图

Fig.2　The TVDI configured by NDVI and LST

根据上述原理利用 16 d LST 和 NDVI 数据计算得到 16 d TVDI 数据。值得注意的是,TVDI 的计算相当于是对 LST 进行最大限度标准化,标准化的上下限不是一个定值,而是随着 NDVI 的不同发生变化,所以 TVDI 与 NDVI 并非同源数据,可以反映出土壤湿度与植被覆盖之间的关系。

2.3　数据平滑与增采样

计算得到每 16d NDVI 和 1-TVDI 数据的多年均值栅格序列,作为年内 NDVI 和 1-TVDI 时间序列数据,并对其采用 Whittaker 平滑器进行平滑[21],原理如下:

$$f = \underset{f}{\operatorname{argmin}}\left[\sum_i (y_i - f_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^k f_i)^2\right] \tag{2}$$

式中:y 为原始序列,f 为平滑序列,$\sum_i (y_i - f_i)^2$ 为 f 的保真度,λ 为正则参数,Δ^k 为 k 阶微分算子。为了方便运算,采用线性代数计算,则上式变为:

$$f = \underset{f}{\operatorname{argmin}}\left[(y - f)^T (y - f) + \lambda (D_K f)^T (D_K f)\right] \tag{3}$$

$$f = (I + \lambda D_k^T D_k)^{-1} y \tag{4}$$

式中:I 为单位矩阵,D_K 为 k 阶差分就很,用以替代 Δ^k。记 $L = I + \lambda D_k^T D_k$,L 越大($L=0,1,2,3$),$f$ 则越平滑,本文为了尽可能保证原有数据变化特征,数据平滑程度采用 $L=0$。

采用傅里叶插值法平滑数据进行增采样。该方法基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将原始 16d 时间序列数据变换到频域上,在频域序列中扩充采样点(补零),然后再反傅立叶变换,增采样成天时间序列(1—353d)。

2.4　时滞互相关分析

本文基于增采样得到的植被覆盖和土壤湿度天数据,根据时滞互相关系数原理计算两者年内最值相关系数和滞后时间,计算如下:

(1)首先,计算不同时滞下植被覆盖与土壤湿度之间的相关系数。

$$r_k(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \overline{x_i})(y_{i+k} - \overline{y_{i+k}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \overline{x_i}) \cdot \sum_{i=1}^{n-k} (y_{i+k} - \overline{y_{i+k}})}} \tag{5}$$

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

式中，$r_k(x,y)$为不同时滞 k 下植被覆盖与土壤湿度的相关系数序列；x_i与 y_i分别为土壤湿度、植被覆盖序列；n 为序列长度；k 为滞后时间（$k=0,\pm1,\pm2,\cdots$），根据经验其值小于等于 $n/4$，由于文中是对天数据的相关分析，所以 $n=353$，k 的最大值取 90。

（2）计算得到各个时滞下的最值互相关系数以及其对应时滞。

$$r_1(k_1) = \max(r_k(x,y)) \tag{6}$$

$$r_2(k_2) = \min(r_k(x,y)) \tag{7}$$

$$\begin{cases} R = r_1, K = k_1 \mid |r_1| > |r_2| \\ R = null, K = null \mid |r_1| = |r_2| \\ R = r_2, K = k_2 \mid |r_1| < |r_2| \end{cases} \tag{8}$$

式中，r_1为时滞 k_1下的植被覆盖与土壤湿度的最大相关系数；r_2为时滞 k_2下的植被覆盖与土壤湿度的最小相关系数；R 与 K 分别为植被覆盖与土壤湿度的最值互相关系数及其时滞。

$K>0$ 表示年内土壤湿度变化影响植被覆盖变化；$K<0$ 表示年内植被覆盖变化影响土壤湿度变化；$K=0$ 表示年内土壤湿度与植被覆盖变化同步。

3 结果与分析

3.1 黄土高原植被覆盖与土壤湿度年内时间变化特征

黄土高原植被覆盖和土壤湿度年内季节变化，如图 3 所示。植被覆盖年内呈增加—减小变化。最低值出现在第 17 天（1 月中旬），之后逐渐上升，经过 NDVI 的一阶差分可知植被在第 113 天（4 月下旬）左右生长发育最为旺盛，植被覆盖变化率为 0.045/月；到第 225 天（8 月中旬）植被覆盖出现最高值 0.497，之后植被开始衰退，第 273 天（10 月上旬）植被衰退最为明显，植被覆盖变化率为-0.061/月。

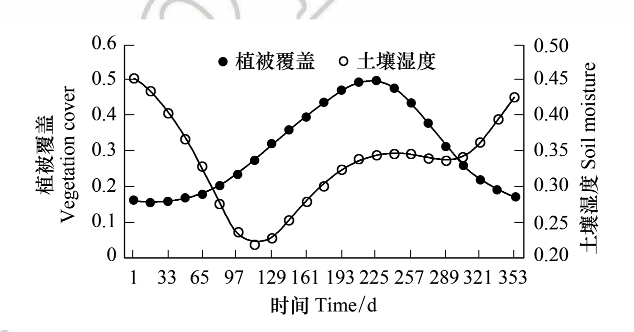


图 3 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的年内季节变化特征

Fig.3 The seasonal variations of vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau

土壤湿度年内呈减小—增加—平稳—增加变化。土壤湿度最高值出现在一年内的 1 月上旬，黄土高原处于封冻期；1 月上旬至 4 月下旬降水量较小，植被逐渐生长发育并达到旺盛期，植被耗水使得土壤湿度逐渐减小至最低值；4 月下旬至 8 月中旬降水量增加，植被生长至最大覆盖量，土壤降水补给大于植被生长耗水，植被覆盖与土壤湿度均不断增大；8 月中旬至 10 月中旬，植被开始退化，该时段黄土高原降水仍然较多，土壤降水补给与植被生理需水趋于平衡，土壤湿度平稳变化，但是表现为微弱的减小变化；10 月中旬至年末，植被进入休眠期，植被生理需水较少，土壤湿度在此期间逐渐增加。

可以看出，植被生长对土壤湿度变化存在明显的时滞效应，植被生长以及植被物候与土壤湿度变化密切相关，植被生长季始期与土壤湿度谷值时刻吻合，植被覆盖峰值时刻、生长季末期分别与土壤湿度平稳期的始期与末期一致，反映出植被不同生长期需水情况，以及植被覆盖变化与土壤湿度变化之间的相互作用。

本文逐个栅格计算得到 2001—2014 年植被覆盖和土壤湿度的多年 16d 均值数据，根据时滞互相关原理，提取两者逐个栅格的年内时间序列，经过 Whittaker Smooth 平滑和傅里叶增采样将数据处理为天数据，并计算其不同滞后时间对应的相关系数，根据相关系数筛选出最高相关程度及其对应时滞（图 4），来解释黄土高原年内植被覆盖与土壤湿度的相互关系。

3.2 黄土高原植被覆盖与土壤湿度时滞互相关空间分布特征

黄土高原植被覆盖与土壤湿度的最值互相关系数和滞后时间空间上分异明显（图 4）。最值互相关系数与时滞空间上呈明显的负相关性，空间相关系数为-0.84，即最值互相关系数为正，时滞为负，反之则正。

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

黄土高原农业与草原生态区北部的晋中—陕北—陇东高原丘陵半干旱草原地带、燕山—太行山山地落叶阔叶林地带,植被覆盖与土壤湿度呈负相关,相关系数小于-0.85,土壤湿度变化影响植被覆盖变化,植被覆盖产生 62—90d 的滞后效应,植被生长对土壤湿度响应迟缓,该地域面积占总面积的 20.73%;其次,宁夏平原、河套平原分属荒漠草原地带和典型草原地带,均有黄河流经,植被覆盖与土壤湿度的最值相关系数介于-0.55—-0.75 之间,宁夏平原植被覆盖滞后时间在 62—90d 之间,河套平原介于 0—62d,面积总计 25.03%。

正相关区域仍然集中于Ⅰ-12,但河流中上游流域范围内正相关较为明显,自东向西主要包括黄河、洛河、泾河和渭河,相关系数大于 0.75,土壤湿度滞后于植被覆盖在 30—69d,自西向东、自南向北滞后时间逐渐增加;湟水谷地及其南北两侧的高寒草甸草原地带,相关系数达到 0.85 以上,土壤湿度滞后于植被覆盖小于 29d。

综上,黄土高原植被覆盖与土壤湿度的年内相关关系及其滞后效应,在不同生态区表现出明显的差异性,反映出不同的植被生态群落的年内生长与土壤水分相互影响特征差异性明显;同一生态区内虽具有统一性,但不同地域上也表现出差异性,黄土高原生态环境的多样性造成生态群落内部还具有差异性。因此,本文选用植被类型数据分析了不同植被年内生长与土壤水分的相互作用关系及时间滞后效应。

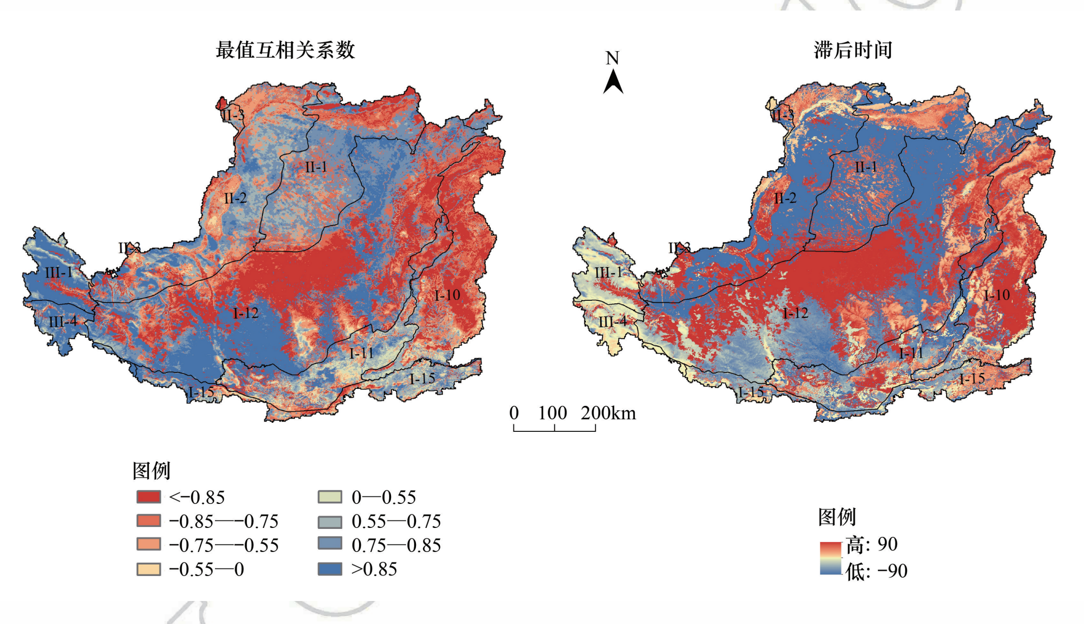


图 4　黄土高原植被覆盖与土壤湿度最值相关系数和滞后时间

Fig.4　The extremum correlation coefficient and lag time of vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau

生态区代码 I-10:燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区,I-11:汾渭盆地农业生态区,I-12:黄土高原农业与草原生态区,I-15:秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区,II-1:内蒙古高原中东部典型草原生态区,II-2:内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区,II-3:内蒙古高原中部草原化荒漠生态区,III-1:祁连山森林与高寒草原生态区,III-4:江河源区-甘南高寒草甸草原生态区

3.3　黄土高原不同植被类型植被覆盖与土壤湿度时滞互相关分析

不同植被类型的植被覆盖与土壤湿度相互影响有所差异,本文利用黄土高原不同植被类型分别统计最值相关系数和滞后时间的平均值,并将其可视化在玫瑰图中,如图 5 所示。

强旱生杂类草(归为Ⅰ类植被)植被覆盖与土壤湿度变化呈负相关,相关系数为-0.583,滞后时间平均为72d,其次分别为沼泽、温性针叶林、落叶阔叶林与温性落叶灌丛(Ⅰ类植被),负相关性依次减弱,植被覆盖产生的滞后效应依次减小至 11d(图 5),说明这 5 种植被生长对土壤湿度变化的响应程度依次减弱,但响应速度在依次加快,主要是由于土壤湿度年内变化不明显引起的;从相关系数来看,负相关性主要表现在时间变化上:1 月初开始土壤湿度降低,到 3 月中下旬降到最低值,植被覆盖变化不明显,之后植被覆盖随土壤湿度增大而增大,经过 K 天(滞后时间)后植被覆盖达到最大值,由于植被耗水土壤湿度变化平稳,在此期间及其后植被覆盖影响土壤湿度变化,植被覆盖的减小引起土壤湿度增加,但其产生的负相关效应小于上半年土壤湿

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

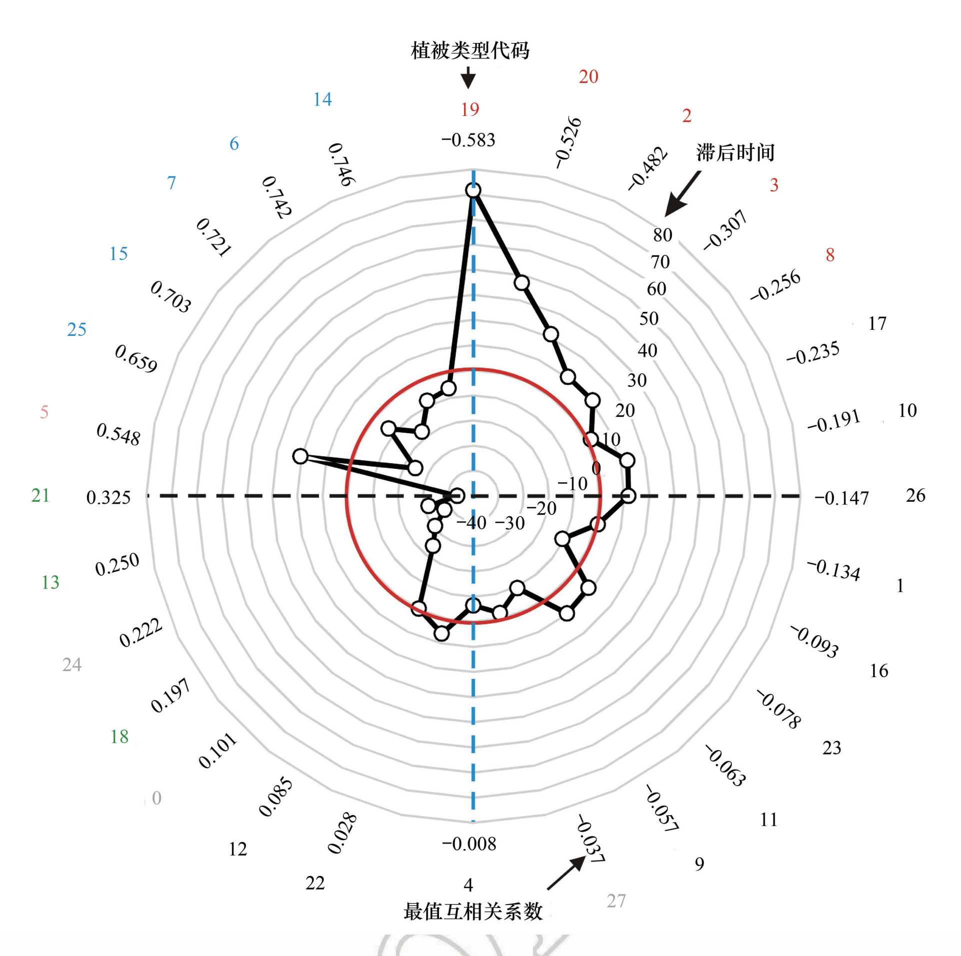


图 5 黄土高原不同植被类型植被覆盖与土壤湿度最值相关系数和滞后时间

Fig.5 The extremum correlation coefficient and lag time of vegetation cover and soil moisture of different vegetation types in the Loess Plateau

名称颜色相同的植被,其变化特征相似,被归为同一类,其中Ⅰ类植被:红色;Ⅱ类植被:黑色;Ⅲ类植被:绿色;Ⅳ类植被:蓝色;无植被:灰色;特殊植被竹林:粉色。植被类型代码:0 居民点;1 寒温性针叶林;2 温性针叶林;3 落叶阔叶林;4 杂木林;5 竹林;6 高寒落叶灌丛;7 高寒常绿灌丛;8 温性落叶灌丛;9 盐地落叶灌丛;10 草丛;11 草甸草原;12 典型草原;13 荒漠化草原;14 高寒草原;15(亚)高山草甸;16 河、湖滩地草甸;17 低地盐生草甸;18 强旱生小灌木、半灌木、灌木;19 强旱生杂类草;20 沼泽植被;21 沙生植被;22 草本栽培植被;23 木本栽培植被;24 沙地;25 高山稀疏植被、裸岩;26 河滩;27 水系

度影响植被覆盖的负相关效应,因此总体上表现为植被覆盖受土壤湿度影响(图 6);从植被覆盖大小来看,低覆盖植被生长对土壤湿度变化的响应程度较高,响应速度较慢,反之高覆盖植被响应程度较低,但响应速度较快;从植被物候来看,随着植被生长季长度增加,植被对土壤湿度的响应程度减小,效应速度加快。

低地盐生草甸、草丛、河滩、寒温性针叶林、河—湖滩地草甸、木本栽培植被、草甸草原、盐地落叶灌丛与杂木林(Ⅱ类植被)植被覆盖与土壤湿度的负相关性依次减弱,草本栽培植被与典型草原(Ⅱ类植被)呈正相关,但其平均相关系数均小于 0.25,滞后时间均在 0 时滞附近上下波动(图 5),反映出植被覆盖与土壤湿度同步变化(年内变化子图较多,略)。

强旱生小灌木—半灌木—灌木、荒漠化草原与沙生植被(Ⅲ类植被)均值相关系数介于 0.15—0.35 之间,滞后时间小于 20d(K<0),反映出其土壤湿度变化滞后于植被覆盖变化,即植被覆盖变化影响土壤湿度发生变化,影响的强度依次增加,但土壤湿度对植被覆盖的响应速度依次变慢(图 5);从相关系数来看,正相关性特征表现在 3 月下旬开始土壤湿度随植被覆盖的增加而增加(图 7);从植被覆盖大小来看,三者均属于低覆盖植被,植被覆盖年内变化较为平缓但其最值依次增大,植被覆盖与土壤湿度变化特征依次变得明显,从而表现为植被覆盖对土壤湿度的影响依次增强。

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201804.00269v1

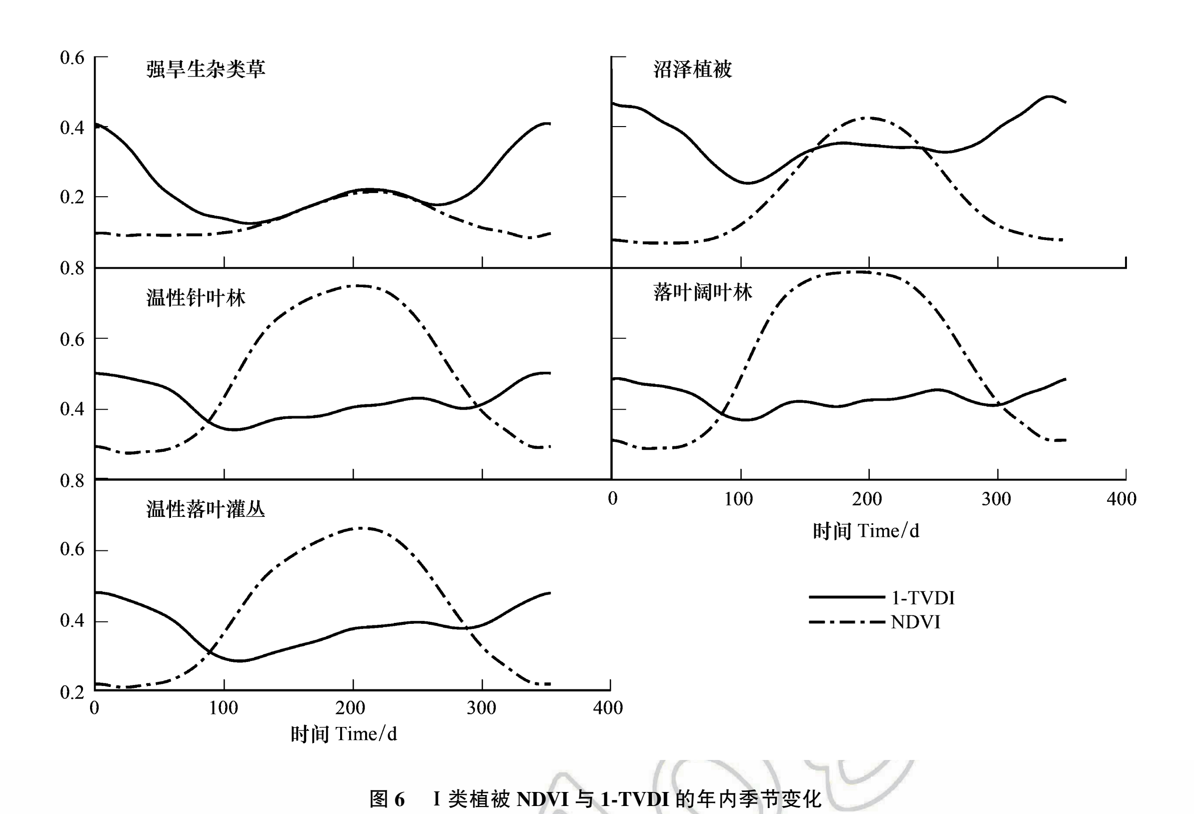


图 6　Ⅰ类植被 NDVI 与 1-TVDI 的年内季节变化

Fig.6　The seasonal variations of NDVI and 1-TVDI of vegetation Ⅰ in the Loess Plateau

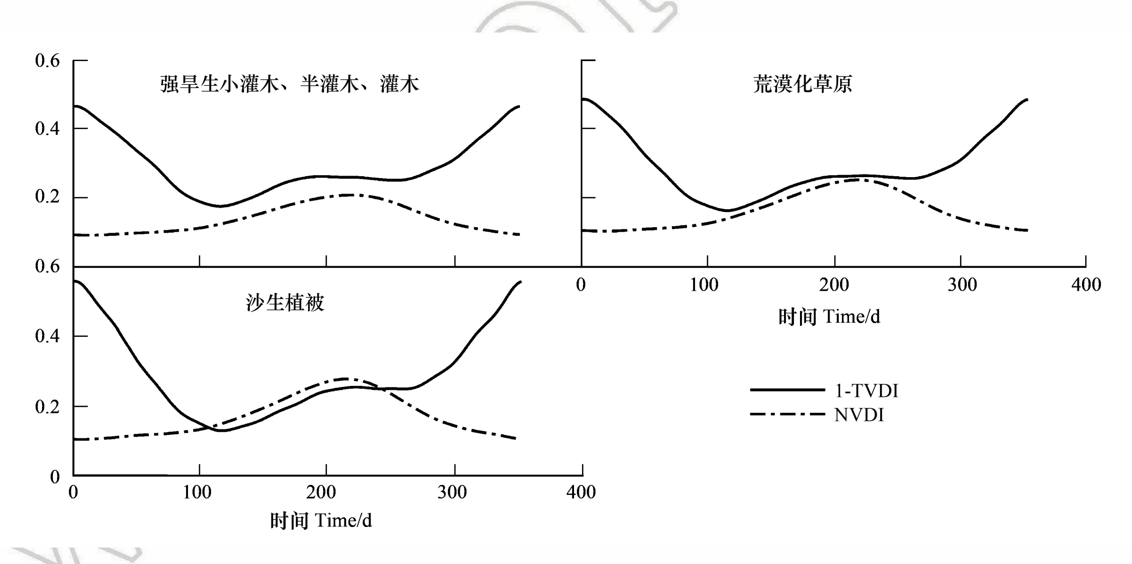


图 7　Ⅲ类植被 NDVI 与 1-TVDI 的年内季节变化

Fig.7　The seasonal variations of NDVI and 1-TVDI of vegetation Ⅲ in the Loess Plateau

高山稀疏植被—裸岩、(亚)高山草甸、高寒常绿灌丛、高寒落叶灌丛与高寒草原(Ⅳ类植被)均值相关系数依次增大,并介于0.6—0.75 之间,滞后时间介于0—30d($K<0$)(图 5),说明高山/高寒植被生长对土壤湿度变化的影响程度最强,而且响应速度较快;从相关系数来看,正相关性依次增加,主要是由于土壤湿度年内变化呈现出增加—减小分布,与植被覆盖变化基本吻合,且土壤湿度变化特征越来越明显,表现在时间变化上,1 月初土壤湿度随植被覆盖逐渐增加,到 6 月中下旬植被达到最大覆盖,植被生理需水较高致使土壤湿度减小,植被衰退后土壤湿度有所回升,到 8 月上中旬土壤湿度随植被覆盖减小而减小(图 8);从植被覆盖大小来看,

ChinaXiv合作期刊

植被生长对土壤湿度变化的影响程度,及土壤湿度的响应速度,与植被覆盖大小关系不明显,土壤湿度的响应速度由快到慢依次为:高寒草原>(亚)高山草甸>高寒落叶灌丛>高寒常绿灌丛>高山稀疏植被—裸岩。

值得注意的是,竹林生长需水条件高且敏感,致使植被覆盖与土壤湿度均值相关系数高达 0.55,滞后时间平均为 20d(图 5),植被覆盖变化滞后于土壤湿度变化。

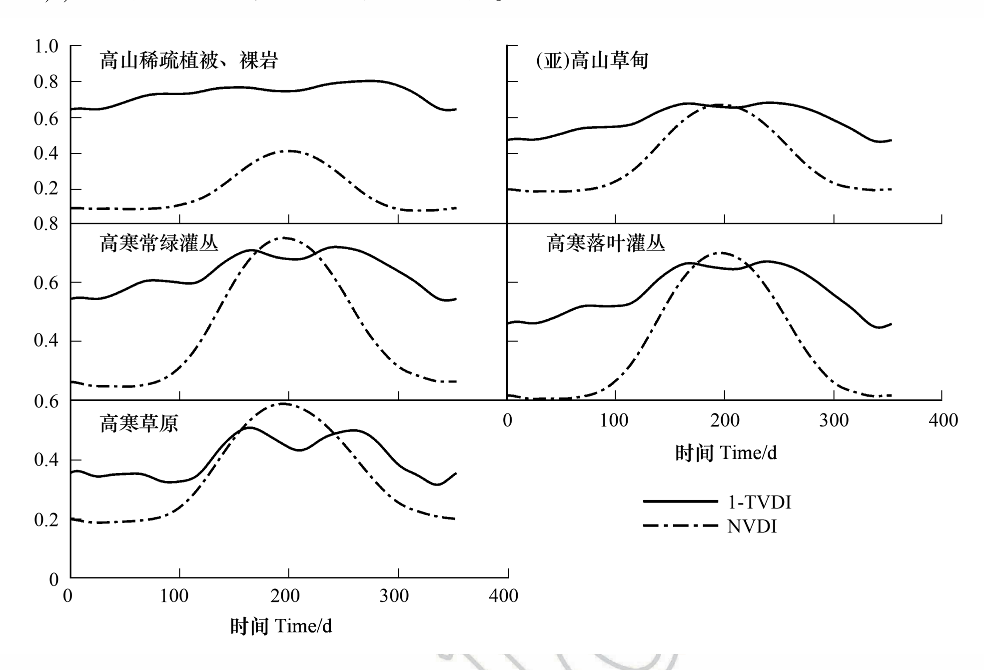


图 8 Ⅳ类植被 NDVI 与 1-TVDI 的年内季节变化

Fig.8 The seasonal variations of NDVI and 1-TVDI of vegetation Ⅳ in the Loess Plateau

植被类型代码:6 高寒落叶灌丛;7 高寒常绿灌丛;14 高寒草原;15(亚)高山草甸;25 高山稀疏植被、裸岩

4 讨论

土壤湿度年内季节变化特征与张蕾等的西北地区土壤湿度变化特征[22]高度吻合,差异性主要表现在土壤湿度变化特征点所对应的时间点不同。土壤湿度最高值出现在一年内的 1 月上旬,4 月下旬土壤湿度降至最低值,而张蕾等分析土壤湿度 12 月中旬至 1 月较高,5 月下旬至 6 月上旬降至最小[22],本文土壤湿度最低值对应时间较张蕾提前了 1 个月以上。原因主要是数据的时间分辨率不同引起的,采用 16d 数据进行分析,而张蕾采用旬值数据,分析中体现了植被生长耗水引起土壤湿度变化,虽然其时间分辨率较高,但缺乏植被覆盖数据作为支撑,土壤湿度特征时间节点与实际植被生长情况不符。分析了植被覆盖年内季节变化特征,植被生长季始期为 4 月下旬,与土壤湿度最低值时间点契合度很好,韦振锋等分析得出陕甘宁黄土高原大多数植被生长季始期为 3—4 月[23],李强等认为生长季始期为 3 月下旬至 5 月下旬[24],谢宝妮等认为生长季始期为 4 月上旬至 5 月下旬[25],证明 TVDI 用来表示土壤湿度变化特征具有很高的可信性。其次,本文在利用时滞互相关方法之前,随年内植被覆盖和土壤湿度数据进行了 Whittaker 平滑和傅里叶插值增采样,一定程度上剔除了数据噪声,提高了信噪比。

从不同植被类型来看,植被生长与土壤水分的年内变化具有密切的关系,土壤水分的增加可以促进植被生长,而植被生长又消耗土壤水分,从而削弱了土壤水分增加速度。对于非高山、非高寒植被来说,上半年土壤湿度的谷值是返青期植被快速生长引起的,下半年土壤湿度的谷值是植被从茂盛期到枯黄期为了维持基本的生理机能,摄取的土壤水分大于雨水等补给造成的;对于高山、高寒植被来说,植被生长需水较少,植被覆盖与土壤湿度增加同步,返青期植被快速生长时,土壤水分大量耗减,过了植被茂盛期,土壤水分因为各种补给以及植被生理需水减小而增加,年末补给减小土壤水分也随之减小,从而形成两个峰值。黄土高原土壤水分

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

年内变化的峰值和谷值与植被物候期非常吻合,因此土壤水分的年内变化可作为植被物候特征提取的一种重要依据。

由基于滞后时间的最值互相关系数计算原理可知,该方法可以在一定程度上反映植被覆盖和土壤湿度的年内相互影响机制。但是当最大和最小相关系数差异性较小,尤其相关系数分别为正值和负值时,得到的最值相关系数不能客观反映植被覆盖和土壤湿度关系,滞后时间难以区分植被覆盖影响土壤湿度变化还是土壤湿度影响植被覆盖变化,因此存在误判的情况。另外,植被物候特征与土壤水分变化密切相关,植被生理需水状况可能是两者关系的契合点,以后应在考虑植被不同生理阶段消耗土壤水分的基础上分析植被覆盖与土壤湿度的相互关系。

5　结论

(1)黄土高原植被生长对土壤湿度变化存在明显的时滞效应,植被覆盖与土壤湿度之间的相互作用渗透于植被生长的整个过程,植被生长以及植被物候与土壤湿度变化密切相关,反映出不同植被生长期需水情况。

(2)黄土高原植被覆盖与土壤湿度之间的最值互相关系数与时滞的空间分布呈负相关。黄土高原土壤湿度对其植被覆盖变化影响强烈区,主要分布在农业与草原生态区北部的丘陵沟壑区,但植被生长对土壤湿度响应迟缓;植被覆盖对土壤湿度变化影响强烈区,分布于西部的高寒地带,响应时间相对最短,其次为农业与草原生态区内河流中上游流域,且土壤湿度对植被覆盖的响应较快,自东向西、自北向南响应逐渐加快。

(3)强旱生杂类草、沼泽、温性针叶林、落叶阔叶林与温性落叶灌丛的植被覆盖与土壤湿度呈较强负相关性,植被生长对土壤湿度变化的响应程度依次减弱,响应速度依次加快。低地盐生草甸、草丛、河滩、寒温性针叶林、河—湖滩地草甸、木本栽培植被、草甸草原、盐地落叶灌丛、杂木林、草本栽培植被与典型草原的植被覆盖与土壤湿度的相关性很弱,滞后时间接近于0d,反映出植被覆盖与土壤湿度同步变化。土壤湿度变化滞后于强旱生小灌木—半灌木—灌木、荒漠化草原与沙生植被的植被覆盖变化,植被覆盖正向影响土壤湿度变化的强度依次增加,但时间效应依次延长。高山/高寒植被生长对土壤湿度变化的正向影响程度最强,而且响应速度较快。

参考文献(References):

[1] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.

[2] 田均良. 黄土高原生态建设环境效应研究. 北京: 气象出版社, 2010.

[3] MEIR I N. Desert ecosystems: environment and producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 25-51.

[4] 白天路. 基于遥感和地面实测水分数据的小流域土壤水分模拟. 西安: 西北大学, 2010.

[5] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90.

[6] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应. 地球科学进展, 2008, 23(7): 685-691.

[7] 李小英,段争虎. 黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展. 土壤通报, 2012, 43(6): 1508-1514.

[8] 蒙仲举,高永,虞毅. 荒漠草原植被覆盖对土壤水分的影响. 节水灌溉, 2009, (3): 9-11.

[9] 刘刚, 王志强, 王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析. 水土保持研究, 2004, 11(01): 126-129.

[10] Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era. Remote Sensing Letters, 2013, 4(4): 364-372.

[11] Karnieli A, Agam N, Pinker R T. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. Journal of Climate, 2010, 23(3): 618-633.

[12] 陈书林, 刘元波. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203.

[13] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533.

[14] 刘立文,张吴平,段永红. 模型的农业旱情时空变化遥感应用. 生态学报, 生态学报, 2014, 34(13): 3704-3711.

[15] Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, Saha S K, Dadhwal V K. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(1): 23-39.

chinaXiv:201804.00269v1

ChinaXiv合作期刊

[16] 宋春桥,游松财,刘高焕. 基于 TVDI 的藏北地区土壤湿度空间格局. 地理科学进展, 2011, 30(5): 570-576.

[17] 邸兰杰,王卫,成贺玺. 基于 ATI 和 TVDI 模型的河北平原土壤湿度遥感反演. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 737-743.

[18] 中国科学院植物研究所. 黄土高原地区植被类型图(1:50 万). 北京: 地震出版社, 1991

[19] 李天祺,朱秀芳,潘耀忠,刘宪锋. MODIS 陆地表面温度数据重构方法研究. 北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(S1):1-7.

[20] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment. 2002, 79(2/3), 213-224.

[21] 杨桂燕,李路,陈和. 基于广义 Whittaker 平滑器的拉曼光谱基线校正方法. 中国激光, 2015, 42(9): 360-368.

[22] 张蕾, 吕厚荃, 王良宇. 中国土壤湿度的时空变化特征. 地理学报, 2016, 71(9): 1494-1508.

[23] 韦振锋, 王德光, 张翀. 近 12 年陕甘宁黄土高原区植被物候时空变化特征. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 423-429.

[24] 李强, 张翀. 近 15 年黄土高原植被物候时空变化特征分析. 中国农业科学, 2016, 49(22): 4352-4365.

[25] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应. 农业工程学报, 2015, 31(15): 153-160.



www.ecologica.cn